

地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估探討

楊濟豪^[1] 曹孟真^[1] 詹尚書^[1] 李亮瑩^[1]
王泰典^{[1]*} 許宗傑^[2] 柯承宏^[3] 陳怡頻^[4]

摘要 岩石工程道路邊坡經現地調查獲得可靠、直接的岩石材料種類與不連續面參數，為確保工程設計施工、設施營運維護及環境水土保持之關鍵資訊。在近年全球氣候變遷與極端氣候事件規模與頻率加大的衝擊下，迅速、精準的工程地質調查工具與作業方法，為落實工程設施與自然環境永續發展的不二法門。本研究利用三維雷射掃描技術（又稱光達技術，LiDAR），運用其可快速取得露頭表面幾何坐標描述點雲的特性，透過 2 處露頭現地地質調查，探討地面光達在工址地質調查之應用，並比較國際岩石力學學會建議工址現地調查作業方法所獲得的參數，分析評估邊坡的穩定特性，據以提出地面光達應用於露頭不連續面調查與岩體工程特性評估的適用性與限制，並提出地面光達應用於露頭調查的作業程序。研究結果顯示，地面光達技術可大幅縮減現地調查作業時間，為露頭不連續面調查與參數評估的新利器，由於室內分析工作量和點雲的精度決定了 LiDAR 應用於露頭不連續面調查的速度與精準度，未來針對調查成果與產出參數的檢核、在地質調查的應用與作業規範，包括點雲解析度、疊合容許誤差以及資料分析與檢核程序等，有待進一步深入研究。

關鍵詞：岩石工程、道路邊坡、工址調查、不連續面、參數評估、地面光達技術。

Application of Ground LiDAR for The Investigation of Outcrop Discontinuities and Estimation of Associated Engineering Characteristics

Ji-Hao Yang^[1] Meng-Chen Tsao^[1] Shang-Shu Zhan^[1] Liang-Ying Li^[1]
Tai-Tien Wang^{[1]*} Chung-Chieh Hsu^[2] Cheng-Hung Ko^[3] Yi-Pin Chen^[4]

ABSTRACT Reliable and direct information about rock slope materials and discontinuity parameters from field investigation are keys to engineering design, structure maintenance and soil/water conservation. Under the impact of global climate change and the surge in extreme weather events, rapid and accurate equipment or procedures for geological engineering surveys are necessary to harmonize engineering facilities with natural environment. This study utilizes 3D laser scanning technology (also known as ground LiDAR), which obtains the coordinates of surface geometry rapidly in point clouds, to survey two outcrops. Applying ground LiDAR in a geological survey, we compare the results with those provided by the International Society of Rock Mechanics, and analyze the slope stability. This study also discusses the applicability and limitations of ground LiDAR technology in discontinuity investigation and estimation of rock mass engineering characteristics. Suggested operating procedures for the use of ground LiDAR technology in outcrop surveys are provided accordingly. The results show that ground LiDAR technology reduces the in-situ operation time significantly, thus facilitating efficient discontinuity surveys and outcrop parameters evaluation. However, the quantities of office work and the accuracy of point clouds depend on the velocity and accuracy of ground LiDAR surveys. Therefore, inspection of survey results and output parameters, along with the application and operating specifications of geological surveys, including point cloud resolution, reasonable error of superimposition, inspection procedures and data analysis, still await further research.

Key Words : Rock engineering, highway slope, site investigation, rock discontinuities, engineering parameter estimation, LiDAR.

[1] 國立臺北科技大學資源工程研究所
Institute of Mineral Resources Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan, R.O.C.
[2] 國立金門大學土木與工程管理學系
Department of Civil and Engineering Management, National Quemoy University, Quemoy, Taiwan, R.O.C.
[3] 中興測量有限公司
Chung Hsing Surveying Co., Ltd., Taichung, Taiwan, R.O.C.
[4] 台灣儀器行
Taiwan Instrument Co., Ltd., Taipei, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail : ttwang@ntut.edu.tw

一、前言

工址工程特性評估與掌握不僅是工程建設設計與施工的關鍵資訊，也是建成基礎設施營運維護以及所處環境水土保持工作必須常備的資料。岩石工程，特別是道路邊坡，在近年全球氣候變遷、極端氣候事件規模與頻率加大的衝擊下，失穩破壞阻斷交通的報導時有所聞（交通部公路防救災資訊系統），包括道路上邊坡落石、岩屑崩滑或平面滑動等造成崩落土石堆積於路面、下邊坡破壞造成路基災害導致交通中斷等，高度影響社會經濟的安定以及環境的永續發展。為了迅速恢復交通，搶災工作必須在第一時間展開，並且往往在高度的社會關注以及輿論壓力下進行，缺乏足夠的時間依據傳統工程建設地質調查、規劃設計、施工與檢驗等階段按部就班地執行，因此搶災工作一次到位的成功案例比例相對較低，其中關鍵因素之一，即是受到災害影響，欲在短時間內展開災區範圍的工程地質調查存在很大的難度，無法取得足夠的資料建立較適當的工程地質模式，提供更有效率的搶災工作與復建作業參考。

露頭調查為傳統的地質調查方法，由地質師或工程師親臨現場直接接觸岩土材料，因此也是最直接和最可靠的調查方法之一。岩石材料的種類和其間的不連續面特性為岩體工程特性的關鍵因素，國內外已經發展多種岩體工程特性半定量的分級法，如 RMR 法、Q 法或是 PCCR 法（張吉佐等，2002），以及其力學特性參數的量化評估準則，如 GSI 法、Hoek-Brown 破壞準則（Hoek et al., 1988）等，可以提供岩石工程評估設計參數的依據。國際岩石力學學會並建議了現場調查的作業方法（Ulusay and Hudson, 2007）。若能在災後立即依據前述岩體工程特性分級或是量化評估準則取得工程特性參數，甚至在平時即建立重要基礎設施沿線的岩體工程特性參數資料庫，對於搶災與復建工作以及水土保持作業，將會有極大的助益。而尋求更有效率、更精準的調查工具與作業方法以及取得資料的評估方式，則為達成此一目標的重要法門。

三維雷射掃描技術又稱光達技術（light detection and ranging, LiDAR）為近年迅速發展的高精度、高解析度、高度自動化與高效率的量測技術。透過雷射對目標物進行高密度的掃描，紀錄雷射訊號的走時與反射強度，可以快速地完成量測工作。早期發展以空載光達（Airborne LiDAR）為主，包括定位定向系統（position and orientation system, POS）、雷射掃描儀（laser scanner）以及控制器（system controller）三個部分。定位定向系統整合了全球定位系統（global position system, GPS）與精密慣性儀（inertial measurement unit, IMU），採用直接地理定位（direct geo-referencing）技術提供航行過程中的精密航跡定位。雷射掃描儀記錄脈衝雷射發射角度與接收之時間差與回波，並轉換為量測距離所需資料以及反射訊號強度。控制器則利用前述兩部分提供資料，推算每個雷射反射點的三維坐標。空載光達適用於大範圍的三維地表掃描，可獲取地形與地貌資料，並可將地面點數據與地表物體點的數據分離，分別產製數值地表模型（digital surface model, DSM）與數值高程模型（digital elevation model, DEM）（Vosselman and Mass, 2001），已經在地質工程各領域逐漸應用（費立沅，2012）。近期亦有採

用可穿透水體的測深光達（Bathymetric LiDAR），測繪水面下的地形與地貌（史天元，2005）。

相對於空載光達與測深光達目前仍以強調三維地形與地貌的測繪，地面光達則利用其在近距離快速取得高密度點雲資料的特性，逐漸在地質調查與大地工程的應用方面顯露其優勢，包括調查岩體不連續面參數（Fekete et al., 2010; Gigli and Casagli, 2011; Lato et al., 2009; Otoo et al., 2011; Poropat, 2006; Slob, 2010; Slob et al., 2007; Sturzenegger and Stead, 2009）、大尺度岩石的粗糙度（Rahman et al., 2006; Tesfamariam, 2007）等，亦有應用於沉積岩中岩性單位的判釋（Burton et al., 2010），以及隧道工程岩體分級評估（Fekete et al., 2010）、變形量測（Van Gosliga et al., 2006; Lemy et al., 2006）以及有關噴凝土厚度控制、岩栓施打間距與隧道超欠挖分析等施工品質控制（Seo et al., 2008）等。

本文探討地面光達在地質調查的應用，首先釐清邊坡露頭調查的項目與必須取得的參數，繼而選定台 9 線與台 8 線公路沿線 2 處露頭進行地質調查，調查工作分別依據國際岩石力學學會有關 10 項不連續面調查項目的建議方法，以及採用地面光達進行掃描與分析，並分別依據不同調查方法所取得的參數，分析評估邊坡的穩定特性，最後探討地面光達應用於露頭不連續面（本文中不連續面為岩層中層理、節理、葉理、片理與劈理的泛稱）調查與岩體工程特性評估的適用性與限制，據以建議地面光達在露頭調查的作業程序。

二、地質調查項目-以露頭調查為例

地質調查的目的不同，調查項目與作業的方法不同，所得結果的整理方式以及繪製的地質圖亦不相同。表 1 以最常見的基盤地質圖、環境地質圖以及工程地質圖為例，說明不同地質圖的測繪目的，並列舉基本的調查項目。

基盤地質圖通常展現地層分類、地層層序與地質構造分布等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史。其測繪的基礎為路線地質圖，主要的野外調查項目包括岩性與不連續面兩大類。岩性的調查項目有：一般岩性、化石、產狀、地層上下界限、地質年代、地層的變形、岩石的變質或換質等，並常需透過室內試驗確定岩石的沉積年代輔助解釋。不連續面的調查項目針對褶皺、斷層、裂隙、劈理、節理與片理等，多採定性描述其位態、數量、破裂程度或情況。現行普遍的地質調查方式為沿著林道、施工道路、登山小徑、稜線、溪谷等路線進行露頭調查，並將觀察所得露頭的位置、岩性與分布範圍、不連續面位態等標示於地形底圖上，再於室內進行內業資料處理，利用製圖法進行岩層與構造線的延伸，最後針對岩性及構造交界帶等重點位置繪製剖面圖，說明其於地面下的空間分布情形。我國目前通行的基盤地質圖包括經濟部中央地質調查所出版的「五萬分之一臺灣地質圖說明書」，全台含離島共分為 76 幅（部分尚在測繪中），以及比例尺更小（如 1/100,000~1/500,000）的地質圖。由於基盤地質圖的比例尺太小，且測繪過程通常忽略成岩地層的地表動態地質演變，如崩積層地表土壤分布範圍與深度等，因此對

於大地工程、地質工程與水土保持等提供的資訊為廣域的區域地質特性，不易精確反應工址的工程特性。

環境地質圖展現地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據。其測繪的基礎通常基於基盤地質圖，調查繪製地表地質災害的分布，例如土石流、山崩、岩層崩滑、順向坡、蝕溝、河岸侵蝕等。環境地質圖的調查程序方面，通常先進行航空照片、衛星影像等遙感探測所得資訊判釋作業，掌握地質災害發生的位置、類型、規模與範圍後，再研擬現地調查與驗證的計畫；現地調查除了查核遙測影像判釋結果的正確性並加以局部修正外，通常評估危害程度、再次發生的可能、有無保全對象以及防災與減災的對策。地質災害位置與鄰近範圍的岩性與不連續面亦為環境地質圖的調查項目之一，岩性部分常著重於一般岩性及其界面與地質災害的相關性，不連續面方面則測量層面、節理、地質構造位態等。我國地質災害規模大且發生頻率高，環境地質圖須時常更新，目前較常見的版本為 1985 年工業研究院調查測繪的「台灣省重要都會區之環境地質資料庫」與 2002 年中央地質調查所始繪測的「坡地環境地質基本圖」及「坡地環境地質災害敏感區分布圖」。

工程地質圖展現工程計畫所在位置的場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需的分段或分區工程特性參數評估、工程行為研判等資訊，以及施工過程執行安全監測、補充地質調查與風險管理的依據。工程地質圖的測繪通常結合遙感探測技術、地球物理探查、地表地質與鑽孔探查等方式，以提昇調查精度與作業效率。在各項探查技術中，地表地質調查常配合鑽孔探查，取得更精確工程特性分段或分區位置、以及工址特性參數為最重要的調查目的，因此對於影響岩體工程特性參數的岩性與不連續面兩大因素，調查工作更需精細。岩性調查除一般岩性外，通常觀察其風化程度，並調查地形地貌、崩積層厚度等廣義的岩性分布；不連續面調查則以國際岩石力學學會 (international society of rock mechanics, ISRM) 建議的 10 項半

定量方法 (Ulusay and Hudson, 2007) 最為完整，包括層理、葉理與節理等不同形成機制、各組不連續面的位態、間距、延續性 (露頭調查判斷所得分級描述) 或延續度 (測線法調查所得轉換為量化描述)、粗糙度、岩壁單軸壓縮強度、隙寬 (fracture width, 或稱張開度)、充填情況、滲流情形、組數、岩塊大小，並繪製適當的調查結果示意圖或整理為表格型式，以評估代表性參數，藉以評估工程施工的穩定性或危害的類型等。露頭狀況不佳或工址多鬆散堆積物者，則以強度係數、聲波速度、風化係數、點載重指數、史密特錘回彈值為指標評估之。我國工程地質圖多數分幅展示地層分布、主要斷層或剪裂帶位置，亦有考慮工程結構與配置位置者，透過空間資訊系統整合繪製案例 (廖志中等, 2006)，可以提供工程設計與施工更精確的資訊。

三、案例邊坡調查

本文於台 9 線與台 8 線公路沿線選擇 2 處邊坡露頭，按 ISRM 建議的不連續面描述方式進行地質調查，並依據調查成果整理代表性參數，應用加拿大 Rocscience 公司之 Swedge 程式進行岩石邊坡穩定分析，提供後續應用 LiDAR 實施調查與應用的比較基礎。其中 Swedge 程式係基於赤平投影分析結果，輸入邊坡的坡向與坡度、不連續面位態與節理面力學特性參數，計算不同岩楔組合的邊坡穩定安全係數，並納入各參數統計分布概念，以獲得不同參數條件下的失穩機率。另外，本研究部分參數係參考徐景祥 (2005) 研究結果，非試驗數據。

1. 案例邊坡一

案例邊坡一位於花蓮縣秀林鄉和仁至清水地區台 9 線里程 169 k 附近，圖 1 顯示其地形分布與地質組成。附近地形坡度約 50°，台 9 線公路通過位置海拔高度約 100 m，上方邊坡至高程約 250 m 範圍的植被不多，草本與灌木植物零星生長；

表 1 常見地質圖展現重點與測繪主要項目 (整理自徐鑑民, 1986; 何善孫, 1986; 陳培源, 1994; 洪口江, 1991; 潘偉樑, 2007; 謝敬義, 2009)

Table 1 The emphasis of normal geological map and major survey project of mapping (arrangement from Hsu, 1986; Ho, 1986; Chen, 1994; Hung, 1991; Pan, 2007; Hsieh, 2009)

圖幅		基盤地質圖		環境地質圖		工程地質圖	
展現重點測繪目的		地層分類、地層層序與地質構造分布等地質資料，可以闡釋成岩（沉積）環境、地質構造演變、古氣候變化等構造地質史		地質災害現象與潛能，提供國土開發、保育與地質災害防治的依據		場址工程地質特性，提供規劃設計作業所需分段或分區工程特性參數、工程行為資訊，以及施工安全監測、補充地質調查與風險管理依據	
調查項目	岩性	1.一般岩性 2.化石 3.產狀 4.地層上下界限、接觸情形、層序 5.地質年代 6.地層之變形 7.岩石之變質或換質		1.一般岩性 2.露頭破壞類型 3.歷史災害事件 4.破壞規模、影響範圍 5.地形、地理位置		1.一般岩性 2.災害區域 3.可能遭遇的地質災害 4.歷史災害事件 5.地形地貌（高差、坡度） 6.崩積層厚度	
	構造不連續面	1.褶皺 2.斷層 3.裂隙	4.劈理 5.節理 6.片理	1.層面位態（順向、逆向、斜交坡） 2.節理位態（落石、楔形、翻倒） 3.斷層類型及延伸方向 4.褶皺類型及延伸方向	1.位態 2.間距 3.延續性 4.粗糙度 5.抗壓強度	6.張開度 7.充填情況 8.滲流情形 9.組數 10.岩塊大小	
		（描述破裂情形、位態、數量、程度）					
	水文條件	×		○		○	
	保全對象	×		○		○	

下邊坡陡直，呈裸露狀鄰近太平洋。案例邊坡附近出露的岩石皆為片麻岩，淺墨綠色，具發達的片麻理，屬大南澳片岩區典型的岩性之一。崩落的片麻岩、大理岩岩塊堆積於下邊坡太平洋海濱，可知大理岩出露於上邊坡特定高程以上。和仁複背斜為案例邊坡附近主要的地質構造，呈南北走向，大致於調查點西側約 200 m 位置通過。

露頭調查沿公路沿線上邊坡進行，調查範圍南段坡面走向 $N45^\circ E$ ，北段 $N20^\circ E$ ，呈 70° 傾向東南。依據 ISRM 建議的 10 個項目進行不連續面調查與半定量描述，並沿邊坡坡面布置長度約 70 m 的測線，依據測線法調查程序詳細記錄與測線交會不連續面的位置、位態、延續情況，據以求得不連續面的代表性位態（本文稱優勢位態）、間距以及延續度。圖 2 為案例邊坡一的露頭照片與測線布置，依據露頭觀察所得，圖 3 繪製不連續面與坡面空間關係立體地質剖面圖（block diagram）。

露頭可見多組發達的節理，位態呈西北走向、傾向西南（NW/S）者最為常見，以 J_1^I 代稱之；另外有一與邊坡平行（NE/S）的解壓節理、另一呈西北走向、傾向東北（NW/N）者，分別以 J_2^I 與 J_3^I 代稱之；以及其他數量較少、分布零散的節理。 J_1^I 間距在 0.6~2 m 之間，分級為「疏」；持續性介於 3~10 m，屬中度延續；粗糙度方面，公尺級呈平面狀，公分級呈階梯狀；岩壁由強硬的片麻岩組成；節理呈張開狀，隙寬 1~10 mm；多數未發現軟弱夾心；呈乾燥狀，局部有水漬。 J_2^I 因平行坡面，無法於現場觀察其間距、延續性與隙寬；粗糙度方面，公尺級呈粗糙狀，公分級呈凹凸狀；岩壁強硬；節理面呈乾燥狀、未發現軟弱夾心、亦無水漬。 J_3^I 間距在 2~6 m 之間，分級為「很疏」；持續性小於 0 m，屬甚低延續；粗糙度方面，

公尺級呈平面狀，公分級呈平順狀；岩壁強硬；節理緊密，隙寬 0.1~1 mm；多數未發現軟弱夾心；呈乾燥狀，無水漬。表 2 整理露頭不連續面調查結果，一併列出測線法量化不連續面間距、延續度的結果。按 J_1^I 、 J_2^I 與 J_3^I 組合估計，單位體積節理數 $J_v^I=5.56$ ，屬中等岩塊，岩塊規模指數 $I_b^I=1.85$ 。

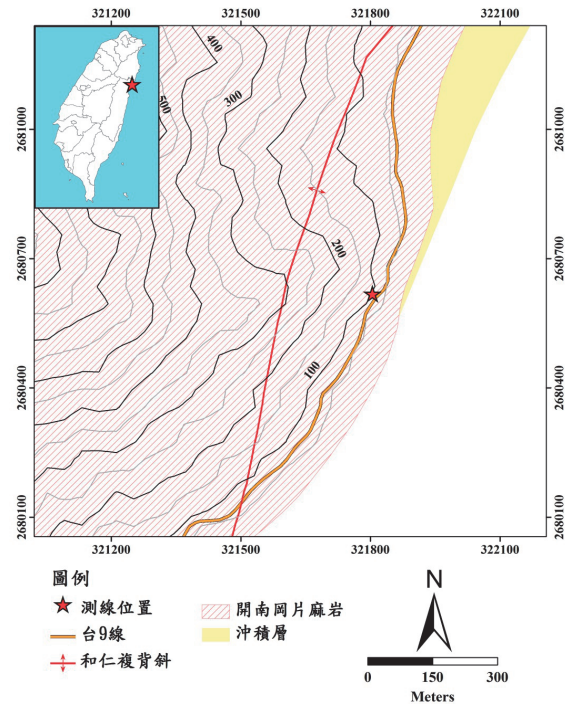


圖 1 案例邊坡一 地質地形圖

Fig.1 The geology and topography of case slope 1

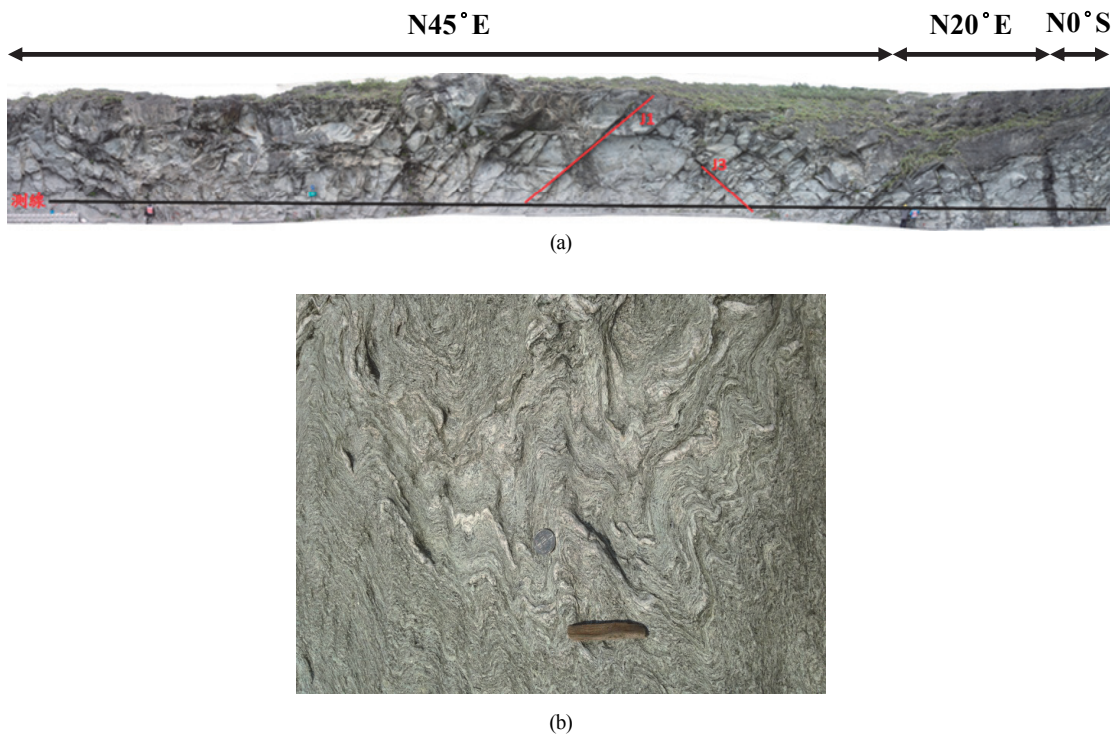


圖 2 案例邊坡一 現地照片，(a) 露頭全景與坡面指示，(b) 露頭近照與岩性判釋

Fig.2 The in-situ picture of case slope 1. (a) the panoramic view of outcrops and point out the direction of slope, (b) lithology interpretation from the close photograph of outcrops

圖 4 為露頭量測節理面位態的赤平投影分析結果, 按極點分布與集中程度, 可決定各組節理的優勢位態, J_1' 為 $N34^\circ W/64^\circ S$, J_2' 為 $N48^\circ E/58^\circ S$, J_3' 為 $N52^\circ W/46^\circ N$ 。依據坡面與各組節理的優勢位態, 根據文獻資料 (徐景祥, 2005) 片麻岩之基本磨擦角約 $30^\circ \sim 50^\circ$, 因此考慮片麻岩基本摩擦角為 36° , 依據不連續面粗糙度調查結果, 考慮粗糙度指數 (joint roughness coefficient, JRC) 介於 8~10, 並依據不連續面間距修正岩體規模效應的影響, 視摩擦角為 34.5° , 赤平投影分析結果初步顯示案例邊坡一存在平面滑動、傾覆與岩楔滑動破壞潛能, 因各組節理優勢位態的標準差較大, 因此其穩定性需進一步確定。

本文繼而採用 Swedge 程式初步評估邊坡岩楔穩定性。除前述調查與分析所得節理面位態與力學特性參數外, 參考 Barton 等 (1985) 建議的節理面節理強度模式, 推估節理面的視凝聚力為 3 kN/m^2 , 分析公路上邊坡與下邊坡的穩定性。考慮公路蜿蜒而行, 分析的邊坡走向為 $N30^\circ E$, 分析坡面坡度設為 70° , 公路上邊坡高位坡面設為 45° , 下邊坡分析高位坡面設為路面, 坡度為 0° 。表 3 整理案例邊坡一的岩楔穩定性分析結果, 平行坡面的 J_2' 自身的平面滑動破壞, 以及與其他節理組構成岩楔破壞的可能性, 其中 J_2' 的平面滑動破壞潛能最高, 潛在滑動體規模亦最大, 從公路下方海灘可以觀察到此種破壞型態以及潛在的滑動岩體 (圖 5); 另外, J_2' 與 J_1' 構成的岩楔破壞具次高的潛能, 公路上邊坡亦可觀察到已滑動破壞岩楔, 養護單位已施作邊坡保護措施。表 3 係為比較岩楔相對穩定目的, 基於假設的參數分析所得, 安全係數與滑動機率係相對參考值, 實際的安全係數尚需更多的調查與試驗加以確定。

2. 案例邊坡二

案例邊坡二位於花蓮縣秀林鄉溪畔至天祥地區之台 8 線里程 175 k 附近, 圖 6 顯示其地形分布與地質組成。附近地形坡度約 55° , 台 8 線公路通過位置海拔高度約 300 m, 上方邊坡至高程約 600 m 範圍的植被不多, 多以灌木及草本植物零星生長; 下邊坡坡度較緩, 呈裸露狀緊鄰立霧溪。案例邊坡附近出露的岩石皆為大理岩, 黑白條紋相間, 具發達的片理及節理, 屬大南澳片岩區典型的岩性之一。崩落的大理岩岩塊堆積於道路路面與下邊坡溪谷位置。案例邊坡無主要地質構造通過。

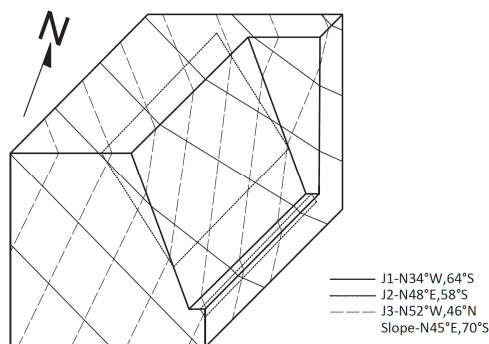


圖 3 案例邊坡一立體地質剖面圖 (block diagram)

Fig.3 The block diagram of case slope 1

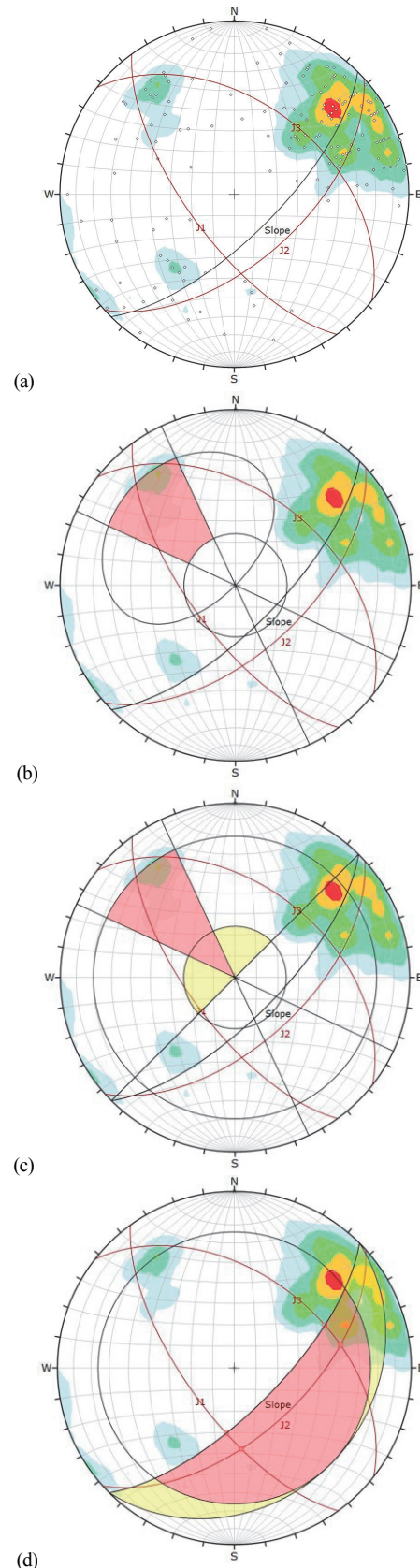


圖 4 案例邊坡一位態極點圖, (a) 露頭量測極點分布圖, 運動機制分析: (b) 平面破壞, (c) 傾覆破壞, (d) 楔形破壞

Fig.4 The pole contour diagram of case slope 1, (a) the point distribution of outcrops surveys. The kinematic analysis, (b) planar failure, (c) toppling failure, (d) wedge failure

露頭調查沿公路沿線上邊坡進行，調查範圍西段坡面走向 N20°E，東段 N35°E，呈 85°傾向東南。依據 ISRM 建議的 10 個項目進行不連續面調查與半定量描述，並沿邊坡坡面布置長度約 100 m 的測線，調查程序和記錄項目與案例邊坡一相同。圖 7 為案例邊坡二的露頭照片與測線布置，依據露頭觀察所得，圖 8 繪製不連續面與坡面空間關係立體地質剖面圖。

露頭可見多組發達的節理，位態呈西北走向者有 2 組，依其傾角大小，將傾向東北 (NW/N) 者以 J_1'' 代稱之，高傾角者以 J_4'' 代稱之；另一組呈東西走向、傾向北方者 (NW/N) 為片理，以 J_3'' 代稱之；另外兩組分別呈東北走向、傾向西北與東南，分別以 J_2'' 、 J_5'' 稱之；其它數量較少、分布零散的節理則未給定代稱。 J_1'' 因出露位置較高且傾向露頭北段坡面，現場難以觀察其間距、延續性、隙寬等；其岩壁強硬、節理面呈乾燥狀、未發現軟弱夾心、局部有水漬。 J_2'' 間距在 6~20 cm 之間，分級為“密”；持續性介於 1~3 m，屬低度延續；粗糙度方

面，公尺級呈粗糙狀，公分級呈凹凸狀；岩壁由強硬的大理岩組成；節理呈緊密狀，隙寬 0.1~1 mm；未發現軟弱夾心；呈乾燥狀。 J_3'' 間距在 20~60 cm 之間，分級為“中”；持續性介於 3~10 m，屬中度延續；粗糙度方面，公尺級呈平面狀，公分級呈平順狀；岩壁強硬；節理呈緊密狀，隙寬 0.1~1 mm；未發現軟弱夾心；呈乾燥狀。 J_4'' 間距介於 6~20 cm，分級為“密”；持續性小於 1 m，屬甚低延續；粗糙度方面，公尺級呈粗糙狀，公分級呈凹凸狀；岩壁強硬；節理呈緊密狀，隙寬 0.1~1 mm；未發現軟弱夾心；呈乾燥狀。 J_5'' 因平行坡面，無法於現場觀察其間距、延續性與隙寬等情況；粗糙度方面，公尺級呈粗糙狀，公分級呈凹凸狀；岩壁強硬；節理面呈乾燥狀、未發現軟弱夾心、亦無水漬。表 4 整理露頭不連續面調查結果。按 J_1'' 、 J_2'' 、 J_3'' 、 J_4'' 與 J_5'' 組合估計，單位體積節理數 $J_v''=12.12$ ，屬小岩塊規模，岩塊規模指數 $I_b''=2.42$ 。

表 2 案例邊坡一露頭不連續面調查結果

Table 2 The result of outcrop discontinuities survey of case slope 1

位置：台9線169 k附近		坐標：321735, 2680561	坡面位態：N45°E/70°S	岩性：片麻岩
不連續面調查				
節理組別		J_1'	J_2' (平行坡面)	J_3'
節理位態走向/傾角 (傾向/傾角)		N34°W/64°S (236/64)	N48°E/58°S (138/58)	N52°W/46°N (322/46)
間距 (m)	ISRM建議	疏 (0.6~2)	—	很疏 (2~6)
	測線法結果	2.54 ± 1.72	—	1.59 ± 1.16
持續性 (m)	ISRM建議	中度 (3~10)	—	很低 (<1)
	測線法結果	2.62 ± 1.95	—	1.52 ± 1.10
粗糙度 (公尺級/公分級)		平面/階梯	粗糙/凹凸	平面/平順
岩壁強度		甚強岩石	甚強岩石	甚強岩石
內寬		開口 (1 mm~1 cm)	—	緊密 (0.1~1 mm)
軟弱夾心		不含	不含	不含
滲水情形		乾燥有滲水	乾燥無滲水	乾燥無滲水
岩塊大小		$J_v=5.56$ (岩塊：中等) $I_b=1.85$		

—：無資料

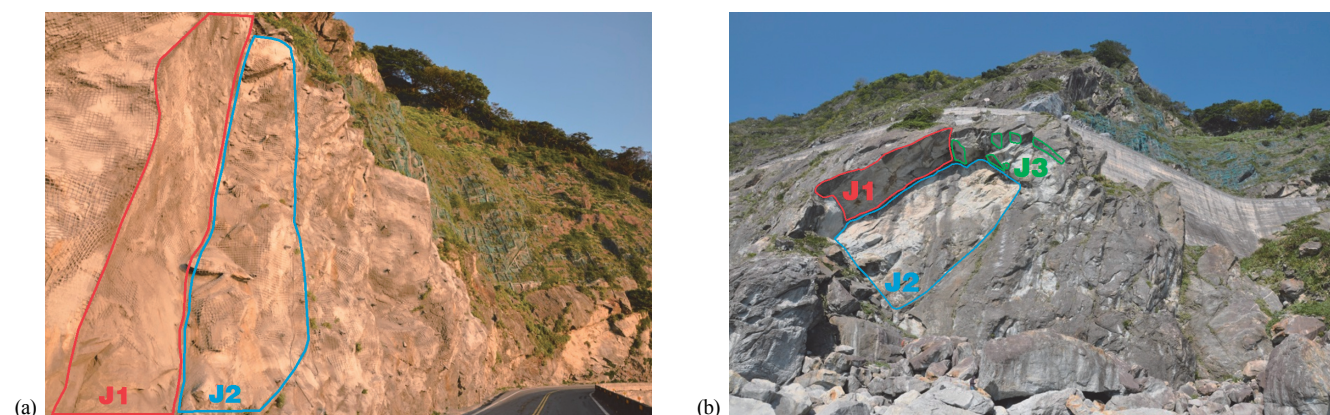


圖 5 公路上下邊坡觀察所得滑動岩楔。(a) 攝於公路旁，可以由 J_2' 與 J_1' 構成的岩楔破壞，(b) 自海邊往上觀察公路下邊坡，可見沿 J_2' 滑動的岩塊

Fig.5 The wedge was observed from top and bottom slope on the road side. (a) the wedge failure was formed by J_2' and J_1' , and was took a picture near the road, (b) the rock which slid along J_2' was observed on the bottom slope of road and looked upward near the sea

圖 9 為露頭量測節理面位態的赤平投影分析結果,按極點分布與集中程度,可決定各組節理的優勢位態, J_1'' 為 N54°W/33°N, J_2'' 為 N19°E/77°N, J_3'' 為 N88°W/59°N, J_4'' 為 N50°W/85°S, J_5'' 為 N71°E/55°S。假設大理岩基本摩擦角為 35°, 依據不連續面粗糙度調查結果,考慮粗糙度指數 (joint roughness coefficient, JRC) 介於 6~8,並依據不連續面間距修正岩體規模效應的影響,赤平投影分析結果初步顯示案例邊坡二亦存在落石、撓曲傾覆與岩楔滑動破壞潛能。

除前述調查與分析所得節理面位態與力學特性參數,推估

大理岩節理面的視凝聚力為 0.5kN/m^2 , 視摩擦角為 35.7° , 分析公路上邊坡與下邊坡的穩定性。分析的邊坡走向為 N35°E, 分析坡面坡度設為 85° , 公路上邊坡高位坡面設為 55° 。表 5 整理案例邊坡二的岩楔穩定性分析結果,平行坡面的 J_5'' 自身的平面滑動破壞,以及與其他節理組構成岩楔破壞的可能性,其中 J_5'' 的平面滑動破壞潛能最高;另外, J_4'' 與 J_5'' 構成的岩楔破壞具次高的潛能,公路上邊坡可觀察到已滑動破壞岩楔。表 5 分析所得安全係數與滑動機率係相對參考值,實際的安全係數尚需更多的調查與試驗加以確定。

表 3 案例邊坡一 岩楔穩定性分析結果

Table 3 The result of rock wedge stability analysis of case slope 1

位置	坡向與坡面	位態資料來源	不連續面組合	岩楔示意	安全係數	失穩機率
道路上邊坡	N30°E, 分析坡面 70° 高位坡面 45°	地質羅盤量測	$J_1^I + J_2^I$		1.00	49%
			$J_2^I + J_3^I$		1.68	0%
		LiDAR 點雲判釋	$J_1^I + J_2^I$	—	—	—
			$J_2^I + J_3^I$		2.17	0%
道路下邊坡	N30°E, 分析坡面 70° 高位坡面 0°	地質羅盤量測	$J_1^I + J_2^I$		1.00	49
			$J_2^I + J_3^I$		1.68	0%
		LiDAR 點雲判釋	$J_1^I + J_2^I$	—	—	—
			$J_2^I + J_3^I$		2.17	0%

—: 無資料

四、LiDAR 調查作業與結果

LiDAR 具有快速取得局部範圍待測目標物詳細的三維坐標與表面反射強度的特性，常見的掃描系統可分為脈衝式及相位式兩種，皆採雷射光束自發射至返回接收器的時間差來計算光束發射點與物體間的距離，得到光束發射點與待測目標物之間的距離後，即可計算待測目標物在坐標系統的空間位置。但因地面掃描作業易受遮蔽物影響，因此通常需架設多個測站依序掃描，不同測站之間掃描所得點雲透過相同的參考點（或稱共軛點）拼接，以取得完整的三維資料。而坐標系統以雷射測距儀機身右方定義為 x 軸方向，掃描方向定義為 y 軸方向，再依右手定則定義 z 軸方向，應用時必須將磁北與 x 軸或 y 軸進行對正作業，以取得正確的空間方向資料。另外亦可於 LiDAR 測站或是共軛點位置實施測量取得三維坐標值，提供後續套疊掃描結果求得絕對坐標的依據。

本文採用的 LiDAR 為 Z+F 公司的 Imager 5010 相位式地面雷射掃描儀，水平向掃描視角 360°，垂直向掃描視角 320°，最大掃描距離達 187 m，水平與垂直最大精度均可達 0.007° rms，每秒掃描點雲數量最大值達 100 萬點以上，作業不受光線昏暗影響，可於任何時段進行掃描，惟雷射遇水或濃霧可能發生散射現象，大幅降低反射訊號強度，影響作業的速度與結果的精度。

1. 掃描程序與資料處理

茲分為掃描作業的前置準備、現場掃描與點雲資料處理與分析三部分，說明本文應用地面光達調查露頭不連續面與評估岩體力學參數的流程。圖 10 示意地面光達應用於露頭不連續面調查的現場作業程序。

(1) 前置準備

- ① 確定調查目的與調查參數，選擇適當的地面光達掃描儀。地質調查需取得不連續面精密的位態、間距、延續度與粗糙度等資料，採用相位 (phase) 原理者通常測距精度較高，應用旋轉稜鏡 (rotating polygon) 或

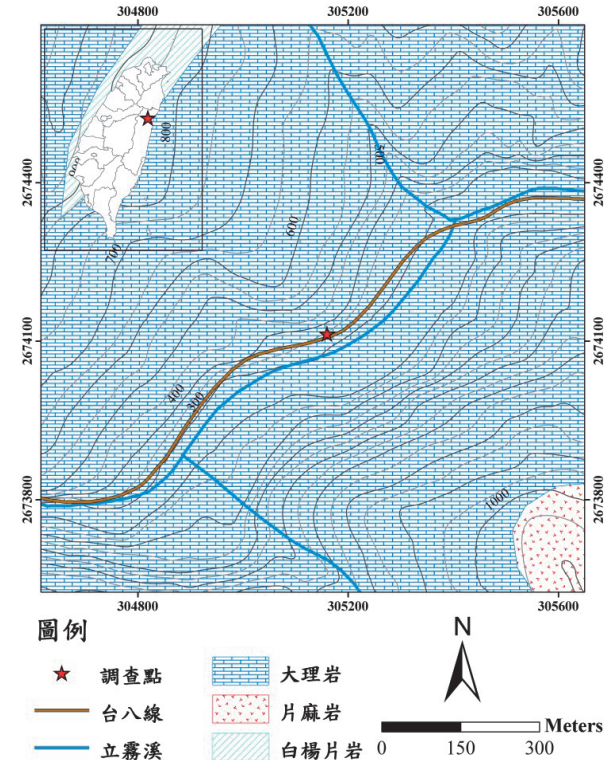


圖 6 案例邊坡二地質地形圖

Fig.6 The geology and topography of case slope 2

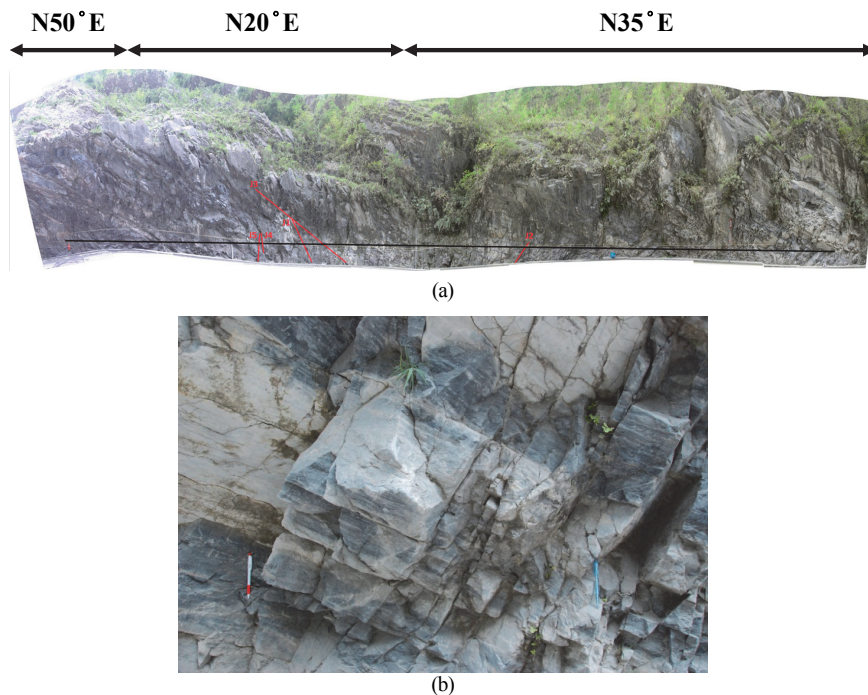


圖 7 案例邊坡二現地照片，(a) 露頭全景與坡向指示，(b) 露頭近照與岩性判釋

Fig.7 The in-situ picture of case slope 2. (a) the panoramic view of outcrops and point out the direction of slope , (b) lithology judging from the close photograph of outcrops

光纖交換 (fiber switch) 方式掃描者取得點雲呈線性排列, 理論上可取得較佳的資料, 亦有利於簡化點雲資料後續的處理流程與工作量;

- ② 透過遙測影像與現場勘察, 瞭解露頭附近狀況並選定調查範圍, 初步評估掃描分區與掃描順序;
- ③ 若掃描所得結果必須以絕對三維坐標呈現, 一併考慮 GPS 測站位置、需配合全站儀平面測量、以及 GPS、全站儀與地面光達整合的作業程序;
- ④ 地面光達掃描站位置與共軛點布置規劃。依據調查目的與調查參數需求, 評估地面光達掃描站與露頭的適當距離, 規劃掃描站位置, 相鄰的掃描站之間至少需布置 4 個以上的共軛點, 據以估計所需的共軛點數量;
- ⑤ 檢討掃描站與共軛點之間的通視問題、掃描期間是否存在移位或振動的可能性, 並加以改善;
- ⑥ 準備掃描計畫書, 內容包括調查目的、調查參數需求、調查位置附近的空間資訊影像、掃描站、共軛點布置初步規劃結果、預計掃描日期、作業人員、記錄與查核作業以及替代方案等。

(2) 現場掃描

- ① 檢核前置作業準備的掃描計畫書, 特別是掃描站與共軛點布置位置的可行性、移位與振動等問題, 必要時調整掃描站位置;
- ② 若掃描所得結果必須以三維坐標呈現, 配合 GPS 與全站儀進行坐標測量;
- ③ 架設地面光達掃描儀, 將儀器 x 軸或 y 軸對準磁北;
- ④ 採用快速掃描模式檢核通視問題以及共軛點位置的適當性; 必要時採用高精度小範圍預掃描模式進行檢核;
- ⑤ 選擇掃描點雲密度並執行掃描作業 (本文採用掃描儀距目標物 10 m 條件下, 點雲間精度不超過 3 mm 模式), 單站掃描完成後, 檢查點雲資料中的共軛點是否完整取得, 必要時重新掃描或採高精度小範圍模式局部補充;

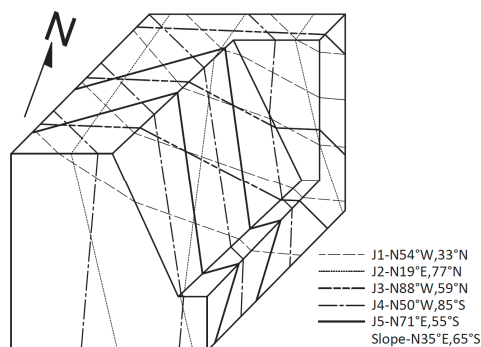


圖 8 案例邊坡二立體地質剖面圖 (block diagram)

Fig.8 The block diagram of case slope 2

- ⑥ 現場掃描作業記錄, 包括作業日期、掃描範圍、測站與共軛點位置簡圖、儀器與磁北關係、掃描時間、作業人員等。

(3) 點雲資料處理與分析

- ① 拼接所有測站掃描所得的點雲資料, 首先計算共軛點的精度, 誤差較大的共軛點, 視精度需求評估是否需剔除, 並重新進行點雲拼接作業;

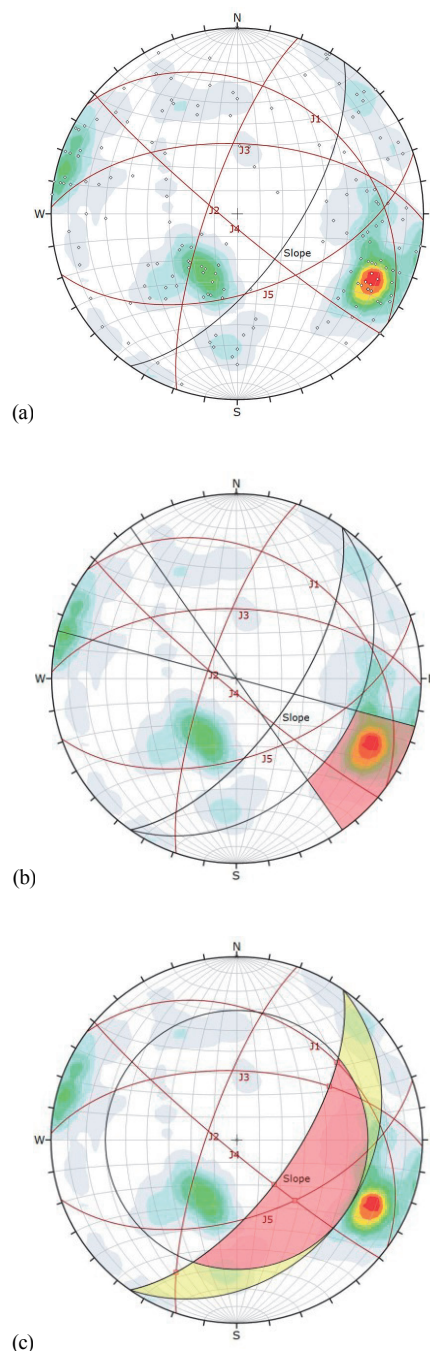


圖 9 案例邊坡二立體地質剖面圖, (a) 點雲資料點雲圖, 運動機制分析: (b) 撓曲傾覆破壞, (c) 楔型破壞

Fig.9 The pole contour diagram of case slope 1, (a) the point distribution of outcrops surveys. The kinematic analysis, (b) flexural toppling failure, (c) wedge failure

- ② 去除雜點，地面光達雷射往返過程可能受塵埃、水霧等因素影響，反射訊號存在些微的散射雜訊，掃描過程難以完全避免局部的遮蔽物等，視為雜點訊號加以濾除。前述①、②項順序可視作業便利性調整；
- ③ 套疊各掃描站取得點雲，給定三維座標，同一位置可能有不同測站掃描所得的多重點雲資料，可以一併使用，或依據反射訊號強度選擇較佳的點雲資料，如需絕對三維坐標資料，一併套疊處理；
- ④ 資料分析，依據前述步驟即可獲得掃描範圍完整的露頭點雲資料，可視需要進行後續的分析，本文主要目標為露頭不連續面的空間資訊，因此先將點雲資料轉換為三角不規則網格的面資料型式，以利後續分析；
- ⑤ 露頭不連續面分析，本文採用 Split-FX 程式，計算不連續面位態、間距、延續度等。

案例邊坡一測線長度約 70 m，案例邊坡二測線長度約 100 m，地面光達的掃描範圍合計約 206 與 120 m，因此選擇單站掃描資料先進行處理，再拼接各站資料。圖 11 為兩邊坡掃描所得拼接完成的三維點雲資料，圖 12 為濾除雜點後的局部放大的點雲資料，除了濾除散射訊號外，亦刪除交通號誌牌以及通行車輛的點雲，圖中明顯可見露頭的不連續面以及大理岩的層次（圖 12(b)）。

2.掃描結果

(1) 案例邊坡一

圖 13(a) 為案例邊坡一測線位置露頭照片以及依據 LiDAR 掃描所得點雲分析之各組不連續面的位置比較，圖中僅展示局部的成果。圖 13(b) 中的點雲資料係以接近垂直坡面的視角繪出判釋所得的不連續面位置， J_2^I 因近乎平行坡面，因此判釋所得的數量最多，與

坡面交角較大的 J_1^I 與 J_3^I ，相對數量較少。若採接近 J_1^I 與 J_3^I 不連續面法線方向的視角觀察（圖 13(c)、(d)），則可清楚看出透過 LiDAR 掃描所得點雲，可以判釋出大部分野外露頭量測不連續面的位置。然而，點雲判釋的不連續面數量甚多，可能包括邊坡開挖過程開炸或機械開挖的人工不連續面，需進一步剔除。

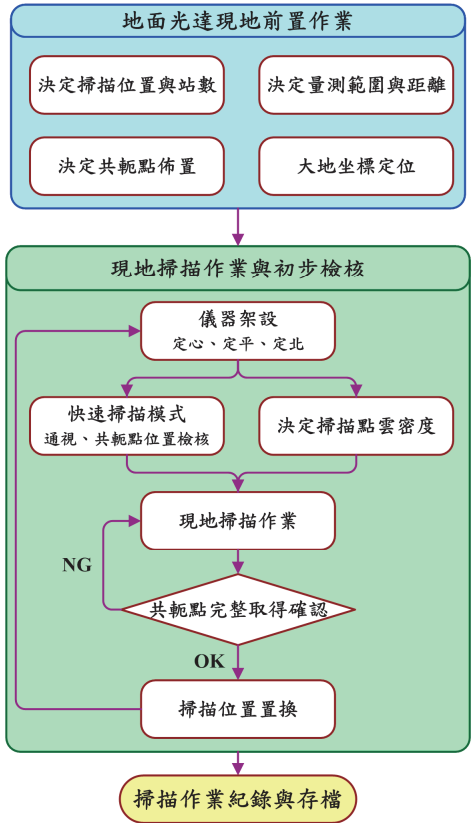


圖 10 LiDAR 掃描作業流程圖
Fig.10 The flow chart of LiDAR scanning operation

表 4 案例邊坡二露頭不連續面調查結果

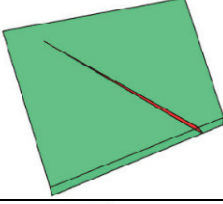
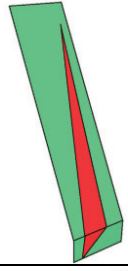
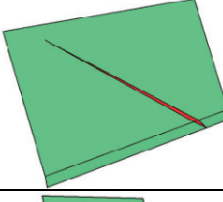
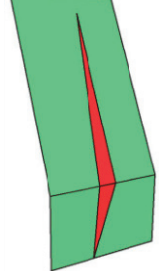
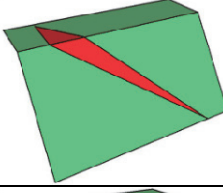
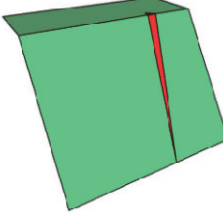
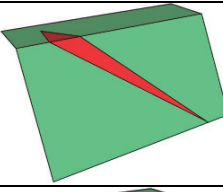
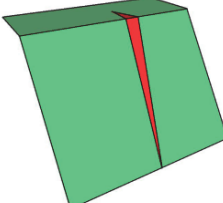
Table 4 The result of outcrop discontinuities survey of case slope 2

位置：台8線175 k		坐標：286362,2675040		坡面位態：N35°E/85°S		岩性：大理岩	
不連續面調查							
節理組別		J_1''	J_2''	J_3'' (S)	J_4''	J_5''	
節理位態走向/傾角 (傾向/傾角)		N54°W/33°S(217/33)	N19°E/77°N(289/77)	N88°W/59°N(2/59)	N50°W/85°S(220/85)	N71°E/55°S(161/55)	
間距 (m)	—	密 (0.06~0.2)	中 (0.2~0.6)	密 (0.06~0.2)	—	—	
	0.97 ± 1.08	0.92 ± 1.13	4.42 ± 4.06	3.01 ± 4.06	2.80 ± 2.35	2.80 ± 2.35	
持續性 (m)	—	低 (1~3)	中度 (3~10)	很低 (<1)	—	—	
	2.00 ± 2.30	2.01 ± 2.59	2.00 ± 2.61	2.10 ± 2.64	2.07 ± 2.55	2.07 ± 2.55	
粗糙度 (公尺級/公分級)		—	粗糙/凹凸	平面/平順	粗糙/凹凸	粗糙/凹凸	
岩壁強度		中強岩石	中強岩石	中強岩石	中強岩石	中強岩石	
內寬		—	緊密 (0.1~1 mm)	緊密 (0.1~1 mm)	緊密 (0.1~1 mm)	—	
軟弱夾心		不含	不含	不含	不含	不含	
滲水情形		不可能滲水	不可能滲水	不可能滲水	不可能滲水	不可能滲水	
岩塊大小		$J_v=12.12$ (岩塊：小) $I_b=2.42$					

—：無資料

表 5 案例邊坡二岩楔穩定性分析結果

Table 5 The result of rock wedge stability analysis of case slope 2

位置	坡向與坡面	位態資料來源	不連續面組合	岩楔示意	安全係數	失穩機率
道路上邊坡	N35°E， 分析坡面85° 高位坡面55°	地質羅盤量測	$J_1'' + J_3''$		1.81	0%
			$J_4'' + J_5''$		0.61	25%
		LiDAR 點雲判釋	$J_1'' + J_3''$		2.16	0%
			$J_4'' + J_5''$		1.33	0%
道路下邊坡	N35°E， 分析坡面55° 高位坡面0°	地質羅盤量測	$J_1'' + J_3''$		3.1715	0%
			$J_4'' + J_5''$		1.7000	0%
		LiDAR 點雲判釋	$J_1'' + J_3''$		2.3796	0%
			$J_4'' + J_5''$		2.7799	0%

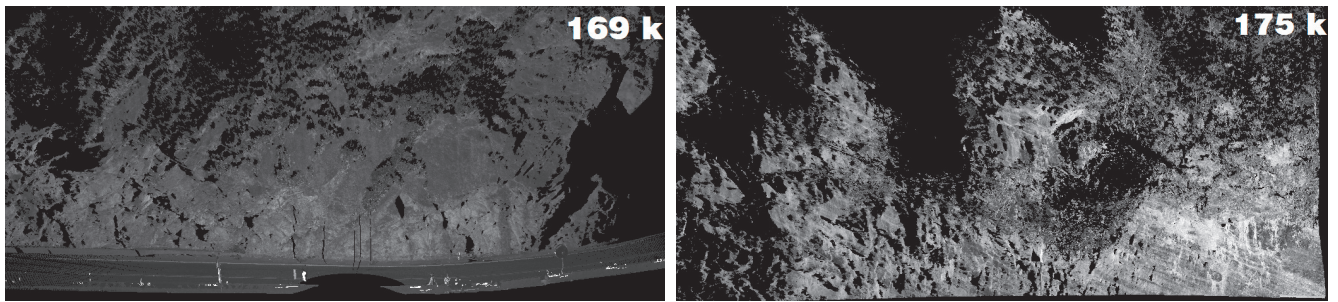


圖 11 案例邊坡原始點雲影像

Fig.11 The original point cloud image of case slope

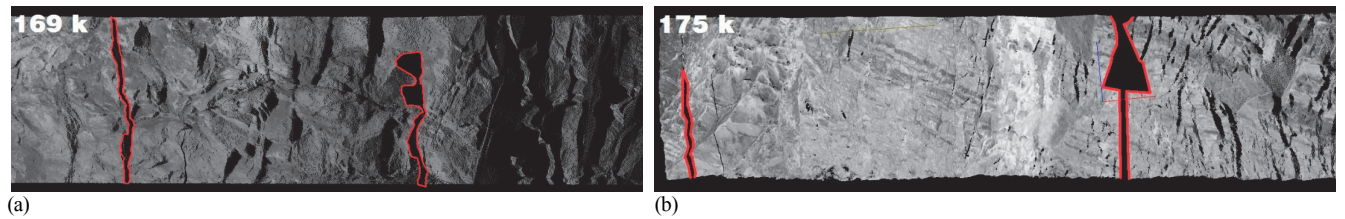


圖 12 經雜點清除後的點雲影像 (包括路牌與車輛等)，(a) 案例邊坡一，(b) 案例邊坡二，紅色圈選處為經剔除後的情形

Fig.12 The point cloud image after removing the noise which including the traffic signs and vehicles, (a) case slope 1, (b) case slope 2. The red circles are the location which was removed

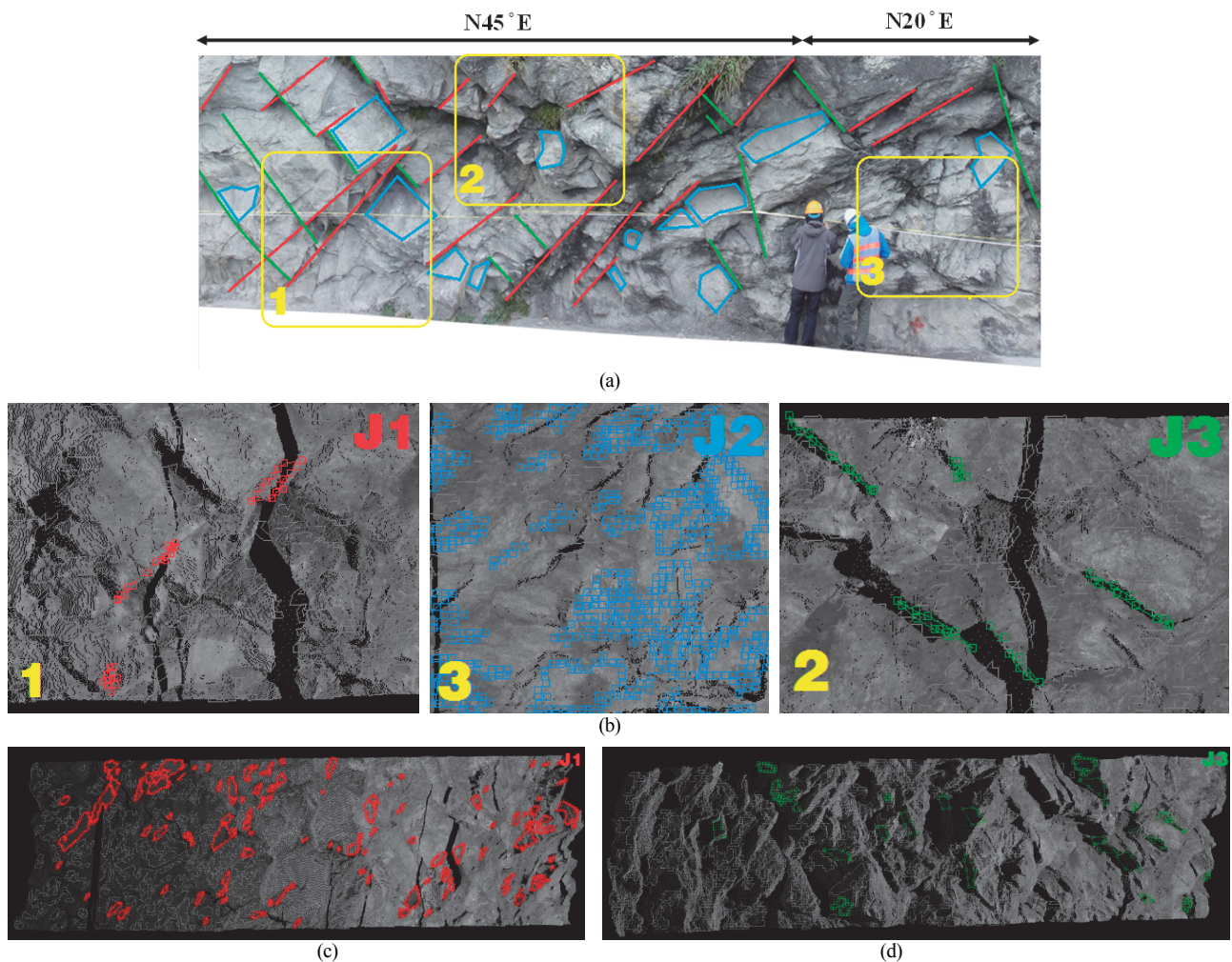


圖 13 案例邊坡一局部露頭照片及其節理分布，與LiDAR判釋結果比較，(a) 現地露頭照片，(b) LiDAR測站三 J_1' 、 J_2' 、 J_3' 點雲分布位置，(c) 平行 J_1' 法向量判釋結果、(d) 平行 J_3' 法向量判釋結果

Fig. 13 The picture and joints distribution of local outcrop of case slope 1, and the comparison with interpretation of LiDAR. (a) the picture of field outcrop, (b) the point cloud distribution of J_1' , J_2' , and J_3' at the station 3 of LiDAR, (c) the interpretation parallel to the normal vector of J_1' , (d) the interpretation parallel to the normal vector of J_3'

圖 14 與表 6 比較露頭量測不連續面位態與 LiDAR 掃描點雲判釋結果, J_3^I 的位態一致性良好; J_2^I 走向誤差 7° , 傾角差異 21° ; J_1^I 則是走向誤差 27° , 傾角差異 11° 。由圖 14 中可知, 透過 LiDAR 掃描點雲資料判釋的不連續面數量遠大於露頭量測結果, 且不連續面在赤平投影圖上極點較為集中, 其中 J_1^I 與坡面近乎垂直部分多數未判釋出, 研判係掃描點雲數密度要求下, 雷射行進面的掃描取得的點雲較為稀疏, 以致資料處理過程描述 J_1^I 的三角不規則網格式面的數量較少, 圖 13(b) 與圖 13(c) 的點雲密度有明顯的差異, 可以說明此為造成 J_1^I 位態誤差較大的原因。其次, 圖 14 中判釋出了數量龐大的代表 J_2^I 的極點, 研判係將近乎平行 J_2^I 的坡面誤判

為不連續面所致。

表 6 中一併比較露頭調查所得不連續面粗糙度與 LiDAR 掃描點雲計算結果, 傳統不易量化描述的不連續面粗糙度, 透過 LiDAR 掃描可快速計算求得, 惟其量值目前尚無法與 ISRM 建議的分類描述結果相互比較。

另外, 表 3 中一併列出利用 LiDAR 掃描點雲判釋位態與粗糙度評估邊坡穩定性的結果, 位態判釋結果因 J_1^I 與 J_2^I 角度的差異下, 在相同的坡面條件, 並無構成岩楔的結果, 因此與露頭調查結果有些出入, 下邊坡模擬結果亦同; 另一組 J_2^I 與 J_3^I 的位態組合下有岩楔的產生, 與露頭調查結果相近, 惟岩楔形狀略有不同。

表 6 案例邊坡—LiDAR 與測線位態角度差異比較與岩楔穩定性分析之節理參數

Table 6 The comparison of the difference of attitude angle between LiDAR and measuring line method, and the joint parameters was used by rock wedge stability analysis of case slope 1

組別	測線法 (傾向/傾角) \pm 標準差	LiDAR (傾向/傾角) \pm 標準差	平均值相對誤差 (傾向/傾角)	粗糙度
J_1^I	234/68 \pm 12/14	261/57 \pm 12/15	27/11	0.96
J_2^I	138/58 \pm 12/11	145/79 \pm 11/6	7/21	0.97
J_3^I	38/46 \pm 17/11	32/46 \pm 16/8	6/0	0.96

節理面參數: JRC—10、JCS—70(MPa)、 σ_m —100(MPa)、 ϕ_b —36($^\circ$)

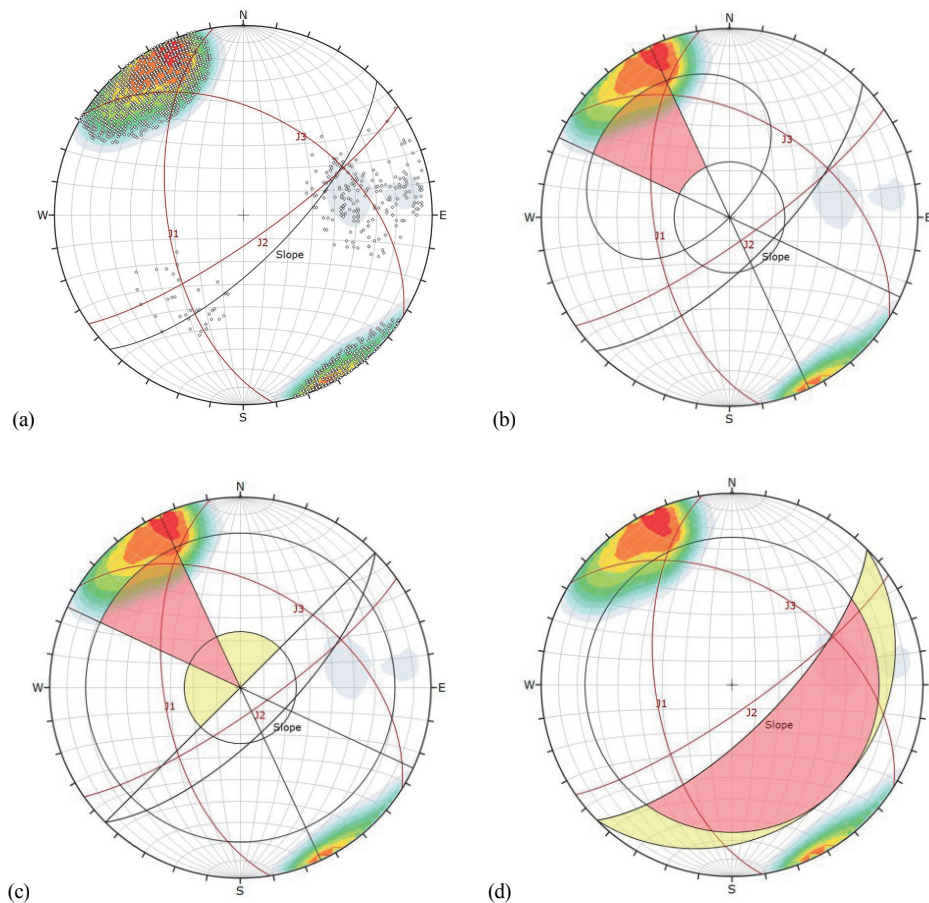


圖 14 LiDAR 位態極點圖, (a) LiDAR 判釋後的極點圖, LiDAR 極點圖運動機制分析: (b) 平面破壞, (c) 傾覆破壞, (d) 楔型破壞

Fig. 14 The pole contour diagram of LiDAR, (a) the point distribution of LiDAR interpretation. The kinematic analysis from LiDAR interpretation, (b) planar failure, (c) toppling failure, (d) wedge failure

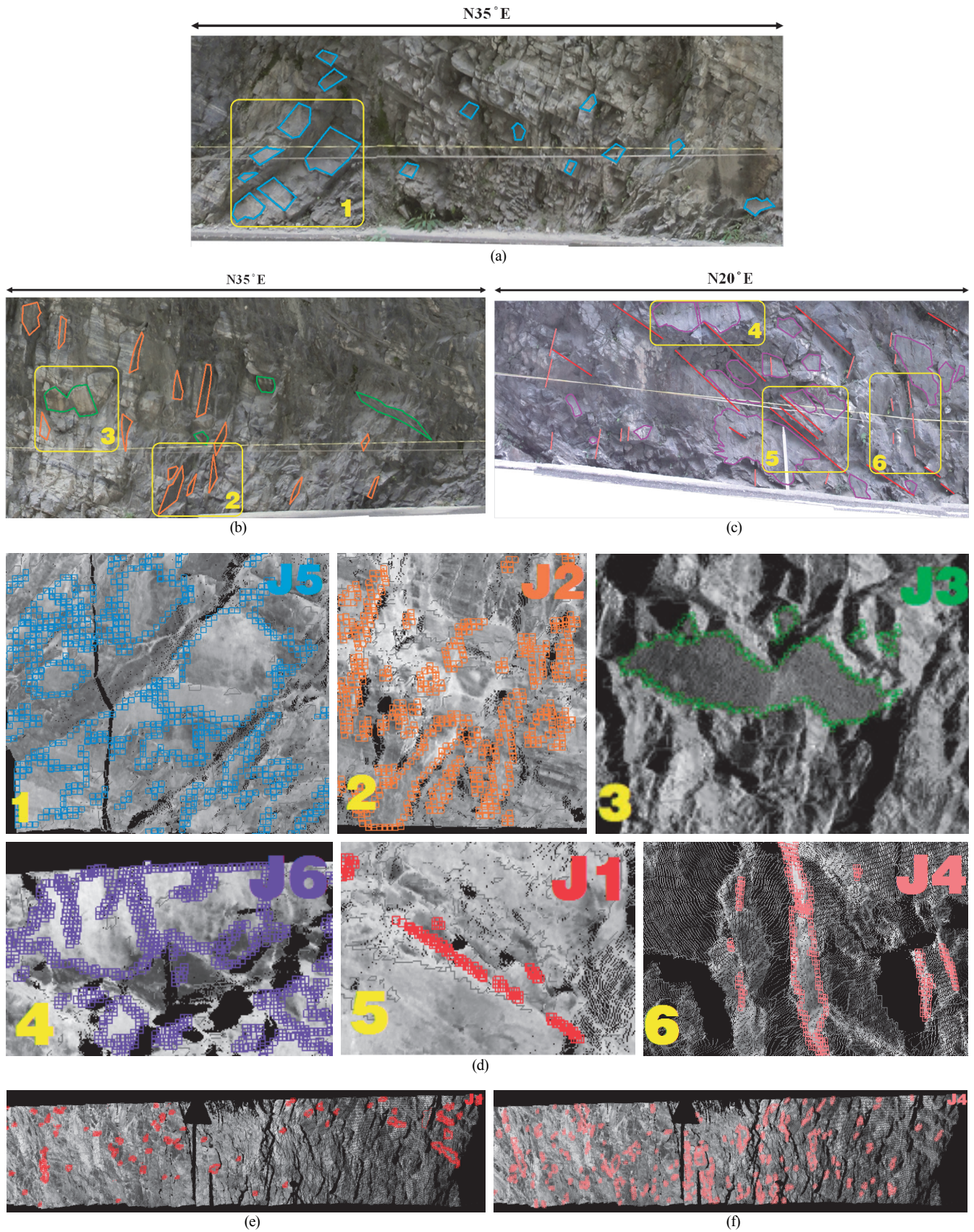


圖 15 案例邊坡二處部露頭照片及其節理分布，與LiDAR判釋結果比較，(a)~(c) 現地露頭照片，(d) LiDAR測站一、二之 $J_1'' \sim J_6''$ 點雲分布位置，(e) 平行 J_1'' 法判釋結果，(f) 平行 J_4'' 法判釋結果

Fig.15 The picture and joints distribution of local outcrop of case slope 2, and the comparison with interpretation of LiDAR. (a)~(c) the picture of field outcrop, (d) the point cloud distribution of J1~J6 at the station 1 and 2 of LiDAR, (e) the interpretation parallel to normal vector of J1, (f) the interpretation parallel to the normal vector of J4

(2) 案例邊坡二

圖 15(a)、(b)、(c) 為案例邊坡二測線位置露頭照片以及依據 LiDAR 掃描所得點雲分析所得各組不連續面的位置比較, 圖中僅展示局部的成果。圖 15(d) 中的點雲資料係以接近垂直坡面之視角繪出判釋所得的不連續面位置, 其中 J_2'' 、 J_3'' 與 J_6'' 因與坡面交角最小, 判釋所得的數量較多; J_3'' 因與坡面呈中角度相交, 判釋數量次之; J_1'' 與 J_4'' 因與坡面交角較大, 判釋所得數量相對最少。圖 15(e)、(f) 採用接近平行不連續面法線方向的視角觀察, 可清楚看出節理的點雲分布, 判釋出大部分野外露頭量測的 J_1'' 與 J_4'' 位置。

圖 16 與表 7 比較露頭量測不連續面與 LiDAR 掃描點雲判釋結果, J_1'' 、 J_3'' 與 J_4'' 與坡面呈中角度相交, 露頭調查與點雲判釋的位態一致性良好; J_2'' 走向誤差 11° 、傾角差異 5° ; J_5'' 走向誤差 30° 、傾角差異 10° ; J_6'' 為點雲資料額外判釋出的組別, 露頭調查過程未判釋出此組不連續面, 因此無量測資料可相互比較。透過 LiDAR 掃描點雲資料判釋的不連續面數量遠大於露頭量測結果, 且不連續面在赤平投影圖上極點較為集中, 因此表 7 中 LiDAR 判釋結果之標準差值整體而言低於露頭量測結果。其中 J_4'' 與坡面垂直, 所獲得的位態資料最少, 研判係因測站間距較大, 以致兩站重合處掃描取得的點雲較為稀疏, 精度較為不足, 進而使資料處理過程描述 J_4'' 的三角不規則網格面的數量較少, 因此同樣變換視角並採用測站二的點雲分析 (圖 15(f)), 以獲得較多的位態資料, 圖 16 顯示大量的 J_6'' 被判釋出, 極點數量為各組中最多, 研判係將近乎平行 J_6'' 的坡面誤判為不連續面所致。

表 7 中一併比較露頭調查所得不連續面粗糙度與 LiDAR 掃描點雲計算結果, 傳統不易量化描述的不連續面粗糙度, 透過 LiDAR 掃描可快速計算求得。

表 5 列出利用 LiDAR 掃描點雲判釋位態評估邊坡穩定性的結果, J_1'' 、 J_3'' 與 J_4'' 因位態角度與露頭調查結果差異不大, 因此 Swedge 分析結果與露頭調查結果相

近, 惟 J_5'' 走向誤差達 30° , 使岩楔形狀與露頭調查的結果略為不同。

五、討 論

ISRM 建議的不連續面描述項目為露頭調查提供現行最完整作業依據, 其中的軟弱夾心充填情況與地下水滲流情況兩項屬定性描述、岩壁單軸壓縮強度屬強度參數, 其餘 7 項則與不連續面的幾何特性有關, 理論上可以透過測量的方式調查獲得。然而受限於調查作業與技術的限制以及調查結果應用需求的影響, 粗糙度、延續性 (度) 與隙寬等項目的調查多採用分級半定量化描述, 而岩塊大小則可透過不連續面組別及其間距計算間接求得, 因此, 野外調查的測量作業以不連續面位態與間距的工作量最大。受到露頭風化、植生或是人工開挖擾動影響, 量測所得通常存在一定程度的變異, 因此 ISRM 建議合理的不連續面位態量測數量應在 80~300 點之間, 並以 150 點以上為宜。

LiDAR 強大的精密測量能力提供了露頭不連續面幾何資料的可能解決方案, 案例邊坡應用結果顯示, 對於與坡面中角度相交的不連續面, 依據不同測站掃描所得點雲資料判釋所得位態一致性良好, 不僅與地質羅盤量測所得平均值相近, 且標準差略小於羅盤量測所得, 顯示點雲資料具有良好的準度 (accuracy) 與精度 (precision); 對於近乎垂直坡面的不連續面, 露頭所見為交線, 點雲判釋所得位態數量相對較少, 疊合點雲資料判釋位態可能出現誤差情況, 透過不同視角點雲判釋成果比對, 或是利用不同測站、不同視角掃描點雲資料進行判釋, 可以有效進行檢核與改善。對於近乎平行坡面的不連續面, 點雲資料可能將大面積的坡面誤判為不連續面, 除了採用前述不同測站資料或以不同視角判釋位態外, 必須比對露頭相片與點雲判釋所得不連續面位置, 以避免錯誤。

點雲資料同時描述了不連續面粗糙幾何、節理間距以及隙寬等資訊, 在不連續面的組數與組別判釋完成後, 可以進一步計算延續度等其他不連續面描述項目。惟此部分參數對於點雲疊合精度的要求更高, 並仰賴人工檢核確認, 例如隙寬的描述以 0.5 mm 與 10 mm 為界, 劃分為閉合 (closed, <0.5 mm)、間隙 (gapped, 0.5~10 mm) 與張裂 (open, >10 mm) 三大類, 並可再細分 9 級, 欲透過大面積掃描的點雲資料描述間隙以下

表 7 案例邊坡二 LiDAR 與測線位態角度差異比較與岩楔穩定性分析之節理參數

Table 7 The comparison of the difference of attitude angle between LiDAR and measuring line method, and the joint parameters was used by rock wedge stability analysis of case slope 2

組別	測線法 (傾向/傾角) ± 標準差	LiDAR (傾向/傾角) ± 標準差	平均值相對誤差 (傾向/傾角)	LiDAR粗糙度
J_1''	33/36 ± 17/10	35/36 ± 15/6	2/0	0.94
J_2''	289/77 ± 10/10	300/82 ± 8/8	11/5	0.97
J_3''	2/59 ± 7/7	356/56 ± 7/6	5/3	0.93
J_4''	220/85 ± 10/6	216/86 ± 8/4	4/1	0.97
J_5''	161/55 ± 13/7	191/65 ± 13/12	30/10	0.96
J_6''	—	152/87 ± 9/8	—	0.95

節理面參數: JRC—6、JCS—100 (MPa)、 σ_m —77.9 (MPa)、 ϕ_b —35(°)

—: 無資料

寬度的不連續面，仍存在技術上的困難度。延續性 (度) 的計算仰賴不連續面與坡面相交跡線的資料，同樣受到前述描述隙寬所需點雲解析度的影響，而粗糙度的描述受不連續面規模影響，比對標準剖面估計 JRC 的方法存在主觀的判斷，儘管點雲資料提供精準的不連續面起伏，但既有的 JRC 計算方式以及規模效應的修正，仍待後續探討。

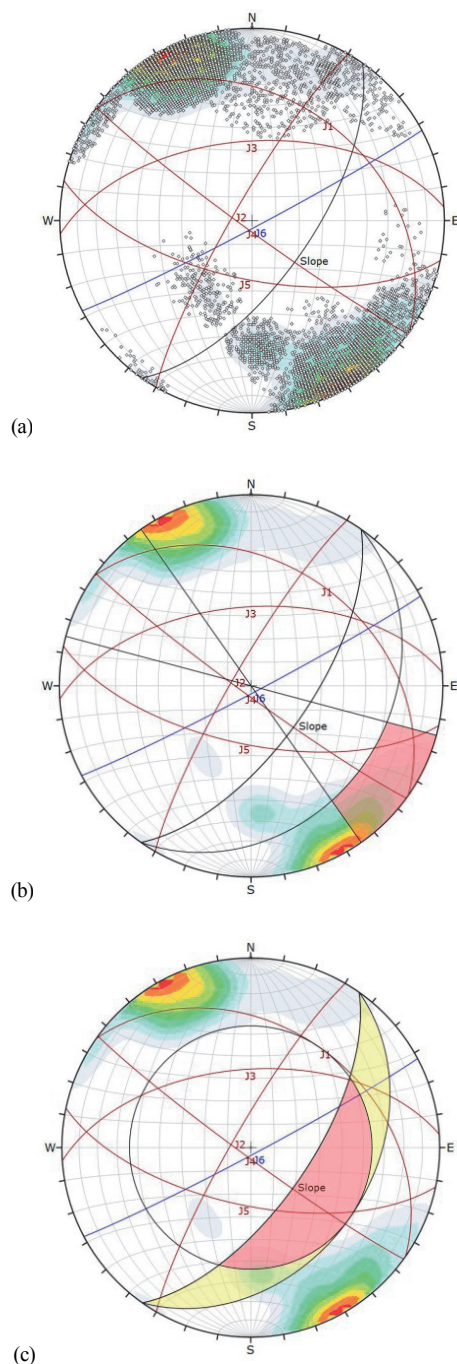


圖 16 LiDAR 位態極點圖，(a) LiDAR 判釋後的極點圖，LiDAR 極點圖淨動機制分析：(b) 掃出傾覆破壞，(c) 楔型破壞

Fig.16 The pole contour diagram of LiDAR, (a) the point distribution of LiDAR interpretation. The kinematic analysis from LiDAR interpretation, (b) flexural toppling failure, (c) wedge failure

本文採用 LiDAR 掃描露頭表面幾何的經驗顯示，每一測站掃描時間僅約 6~7 分鐘，若再考慮儀器架設、共軛點布置、現場資料檢核以及必要的局部高精度掃描等，每一處露頭點約費時 2 小時可取得調查範圍的點雲資料，較傳統人工調查快速。然後續的室內資料處理與分析作業則需較多的時間，並可能存在不同測站掃描所得共軛點或疊合點雲誤差、雷射反射訊號因散射產生雜點過多，以致點雲資料處理費時費力，甚至必須重新掃描的情況。事前完整的調查作業規劃，對於應用先進的調查設備如 LiDAR，以達到精準、有效、快速與經濟的露頭調查，更顯重要。

六、結論與建議

LiDAR 具有快速取得露頭表面幾何坐標描述點雲的特性，透過本文兩個邊坡調查案例，初步驗證其為露頭不連續面調查與參數評估的新利器，掌握其應用性與限制，有利於後續場址特性調查應用。點雲資料若結合 GPS 與全站儀測量，並可將露頭調查資料擬合大地坐標，整合於空間資訊系統內，有利於國土資源整合、環境保育以及防救災快速取得資訊等業務，未來應用前景可期。

LiDAR 應用於工程地質調查可大幅縮減現地作業時間，但增加了室內分析的工作量，因此調查成果與產出參數的檢核甚為重要。點雲的精度決定了 LiDAR 應用於露頭不連續面調查的精準度，然而目前有關 LiDAR 掃描作業程序、點雲精度的探討等多著重於幾何測量課題，有關地質調查的應用與作業規範，包括點雲解析度、疊合容許誤差以及資料分析與檢核程序等，有待進一步深入研究。

誌謝

本文蒙台灣儀器行阮英彥經理、中興測量有限公司協助 LiDAR 露頭掃描作業與後續點雲資料處理，劉啟清博士惠賜寶貴意見得以順利完成，特此申謝。

參考文獻

- [1] Burton, D., Dunlap, D.B., Wood, L.J., and Flaig, P.P. (2010). "Lidar intensity as a remote sensor of rock properties." *Journal of Sedimentary Research*, 81(5), 339-347.
- [2] Fekete, S., Diederichs, M., and Lato, M. (2010). "Geotechnical and operational applications for 3-dimensionallaser scanning in drill and blast tunnels." *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5), 614-628.
- [3] Gigli, G., and Casagli, N. (2011). "Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LiDAR point clouds." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 187-198.
- [4] Hoek, E., and Brown, E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update. *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.* (ed. J.H. Curran), Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto, 31-38.

- [5] Lato, M., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J., and Harrap, R. (2009). "Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rock masses." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 194-199.
- [6] Lemy, F., Yong, S., and Schulz, T. (2006). "A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology." In: The 10th IAEG International Congress, IAEG2006.
- [7] Otoo, J.N., Maerz, N.H., Duan, Y., and Xiaoling, L. (2011). "Lidar and optical imaging for 3-D fracture orientations." In: 2011 NSF Engineering Research and Innovation Conference, Atlanta, Georgia.
- [8] Poropat, G.V. (2006). Remote 3D mapping of rock mass structure. In: The Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization.
- [9] Rahman, Z., Slob, S., and Hack, R. (2006). "Deriving roughness characteristics of rock mass discontinuities from terrestrial laser scan data." In: The 10th IAEG International Congress, IAEG2006.
- [10] Ulusay, R., and Hudson, J.A. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Part 1, 3-50.
- [11] Seo, D.J., Lee, J.C., Lee, Y.D., Lee, Y.H., and Mun, D.Y. (2008). "Development of cross section management system in tunnel using terrestrial laser scanning technique." In: The XX1st ISPRS Congress: Silk Road for Information from Imagery.
- [12] Slob, S., Hack, H.R.G.K., Feng, Q., Roshoff, K., and Turner, A.K. (2007). "Fracture mapping using 3D laser scanning techniques." In: The 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics: The Second Half Century of Rock Mechanics, Lisbon, Portugal.
- [13] Slob, S. (2010). "Automated rock mass characterization using 3D terrestrial laser scanning. Unpublished Doctoral Degree." Technical University of Delft, Zutphen, The Netherlands.
- [14] Sturzenegger, M., and Stead, D. (2009). "Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 267-287.
- [15] Tesfamariam, E.L. (2007). "Comparing discontinuity surface roughness derived from 3D terrestrial laserscan data with traditional field-based methods." Unpublished Dissertation/Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, The Netherlands.
- [16] Van Gosliga, R., Lindenberg, R., and Pfeifer, N. (2006). Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. In: Image Engineering and Vision Metrology. ISPRS Commission, vol. 36, pp.167-172.
- [17] Vosselman, G., and Maas, H.G. (2001). "Adjustment and filtering of raw laser altimetry data." Editor Kennert Torlegard, Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 1-3 March, Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry 100 Stockholm. Stockholm. 62-73
- [18] 徐鐵良 (1986): 「地質與工程」, 中國工程師協會, 第六版, 台北。(Hsu, T.L. (1986). *Geology and engineering*, Chinese Institute of Engineers, Sixth Edition, Taipei. (in Chinese))
- [19] 何春蓀 (1986): 「臺灣地質概論: 臺灣地質圖說明書」, 經濟部中央地質調查所出版, 臺北。(Ho, C.S. (1986). *An introduction to the geology of taiwan explanatory text of the geologic map of Taiwan*, Central Geological Survey published, Taipei. (in Chinese))
- [20] 陳培源 (1994), 「野外及礦業地質學」, 正中書局, 台灣。(Chen, P.Y. (1994). *Field and mining geology*, Cheng Chung Bookstore, Taiwan. (in Chinese))
- [21] 洪如江 (1991), 「初等工程地質學大綱」, 財團法人地工技術研究發展基金會, 台北。(Hung, J.C. (1991). *An outline of elementary engineering geology*, Sino-Geotechnics Research and Development Foundation, Taipei. (in Chinese))
- [22] 潘國樑 (2007), 「工程地質學導論」, 科技圖書, 臺北市。(Pan, K.L. (2007). *An introduction of engineering geology*, Scientific & Technical Publishing Co., Ltd., Taipei. (in Chinese))
- [23] 謝敬義 (2009), 「地質學與大地工程」, 科技圖書, 台灣。(Hsieh, C.I. (2009). *Geology and geotechnical engineering*, Scientific & Technical Publishing Co., Ltd., Taiwan. (in Chinese))
- [24] 羅偉 (1993), 大禹嶺圖幅及說明書。五萬分之一臺灣地質圖及說明書, 第 27 號, 經濟部中央地質調查所出版。(Lo, W. (1993). *Geological map and explanatory text of Taiwan 27 Tayuling*, Geological map of Taiwan scale 1:50,000, Central Geological Survey published. (in Chinese))
- [25] 羅偉、劉佳玫、楊昭男、王執明 (2009), 新城圖幅及說明書。五萬分之一臺灣地質圖及說明書, 第 28 號, 經濟部中央地質調查所出版。(Lo, W., Liu, C.M., Yang, C.N., and Wang, C.M. (2009). *Geological map and explanatory text of Taiwan 28 Xincheng*, Geological map of Taiwan scale 1:50,000, Central Geological Survey published. (in Chinese))
- [26] 管立豪 (2007), 「光達技術在林業經營管理應用」, 台灣林業期刊, 第 33 卷, 第 6 期, 第 25-29 頁。(Kuan, L.H. (2007). "An application of LIDAR technology in forestry management." *Taiwan Forestry Journal*, Vol.33, No.6, 25-29. (in Chinese))
- [27] 劉進金、史天元 (2010), 「空載光達與國家空間資訊基礎建設」, 國土資訊系統, 第 37 期, 第 11-17 頁。(Liu, C.C., and Shih, T.Y. (2010). "Airborne lidar and The National Space information infrastructures." *National Geographic Information System*, No.37, 11-17. (in Chinese))
- [28] 劉世桐、李佳翰、王泰典 (2012), 「從中橫公路東段養護經驗探討工程地質特性對公路養護之影響」, 地工技術

- 雜誌，第 131 期，第 35-46 頁。(Liu, S.T., Lee, C.H., and Wang, T.T. (2012). "Geological characteristics and associated influences on highway maintenance engineering - revealed by experience learned from east section of central - cross island highway." *Sino-Geotechnics*, No.131, 35-46. (in Chinese))
 - [29] 陳營富、王泰典 (2012)，「蘇花公路修築養護的演進與其受沿線工程地質特性的影響」，地工技術雜誌，第 131 期，第 47-58 頁。(Chen, Y.F., and Wang, T.T. (2012). "Historical construction and maintenance of suhua highway and associated influence by geotechnical characteristics." *Sino-Geotechnics*, No.131, 47-58. (in Chinese))
 - [30] 張吉佐、侯秉承、李民政等人 (2000-2002)，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立－工作項目 D：台灣岩體分類與隧道支撐系統之建立，公共工程委員會。(Chang, C.T., Hou, P.C., and Li, M.C. (2000-2002). "Establishment of Rock Mass Classification System and Tunnel Engineering Database in Taiwan - project D: PCCR-System." Public Construction Commission Executive Yuan. (in Chinese))
 - [31] 史天元 (2005)，測深光達原理與國外測試成果，內政部『辦理 LIDAR 之高精度及高解析度數值地形測繪、資料庫建置與應用推廣工作案』成果發表暨應用研討會，新竹縣，工業技術研究院，第 119-122 頁。(Shih, T.Y. (2005). The Bathymetric LIDAR principle and the foreign test results, Ministry of the Interior of results published cum application seminar of "LiDAR Measurement Areas of handling precision and high-resolution digital terrain mapping, database construction and application promotion case." HsinChu County, Industrial Technology Research Institute, 119-122. (in Chinese))
 - [32] 廖志中、潘以文、林志平、徐志謙、王慧蓉、胡賢能、廖培明、楊光程 (2006)，「整合性岩盤工址調查案例」，岩盤工程研討會，台南，209-218 頁。(Liao, C.C., Pan, Y.W., Lin, C.P., Hsu, C.C., Wang, H.J., Hu, H.N., Liao, P.M., and Yang, K.C. (2006). "An integrated bedrock site investigation of a case." Taiwan Rock Engineering Symposium, Tainan, 209-218. (in Chinese))
 - [33] 費立沅 (2012)，「地質調查新利器—空載光達」，地質，第 31 卷，第 2 期，第 18-19 頁。(Fei, L.Y. (2012). "Geological Survey of new technology-Airborne LiDAR." *Ti-Chih*, Vol.31, No.2, 18-19. (in Chinese))
 - [34] 徐景祥 (2005)，淺談岩石基礎之承載能力，台灣公路工程，第三十一卷，第九期，第 2-12 頁。(Syu, J.S. (2005). "Discussion on the basis of the load capacity of rock." *Taiwan Highway Engineering*, Vol.31, No.9, 2-12. (in Chinese))
 - [35] 交通部公路防救災資訊系統，<http://bobe168.tw/>。(Highway Disaster Information System, Ministry of Transportation and Communications, <http://bobe168.tw/>, (in Chinese)).
-
- 2013 年 06 月 08 日 收稿
2013 年 07 月 08 日 修正
2013 年 08 月 02 日 接受
- (本文開放討論至 2014 年 9 月 30 日)